

MOLNÁR LÁSZLÓ

*Dinamikai jelenségek RR Lyrae csillagokban*

Doktori értekezés tézisei

Témavezető: Dr. Kolláth Zoltán

MTA doktora, tudományos tanácsadó, egyetemi tanár

MTA CSFK, NYME SEK TTK

Konzulensek:

Dr. Szabó Róbert

tudományos főmunkatárs, MTA CSFK

Dr. Szabados László

MTA doktora, tudományos tanácsadó, MTA CSFK

Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar  
Fizika Doktori Iskola – Részecskefizika és csillagászat Program

A Doktori Iskola vezetője: Dr. Palla László

Programvezető: Dr. Csikor Ferenc

2013



## 1. A kutatási téma háttere

Az RR Lyrae csillagok régóta ismert, az asztrofizika számára nagy jelentőséggel bíró égitestek. Távolságindikátorokként a kozmikus távolságskála egyik kezdő lépcsőfokát jelentik, segítségükkel gömbhalmazok és közeli galaxisok távolsága határozható meg. II. populációs csillagokként az öreg csillagpopulációk, így például galaktikus halók térképezésére is igen alkalmasak.

Az utóbbi évtizedig az RR Lyrae csillagok pulzációját meglehetősen egyszerűnek tartották. A klasszikus felosztás szerint ezek a csillagok valamelyik radiális módusban, az alapmódusban, az első felhangban vagy pedig mindkettőben pulzálnak. A legkomolyabb ismeretlen tényező a már száz éve ismert, de még megfejtetlen Blazskó-effektus volt: az alapmódusú csillagoknak nagyjából fele és az első felhangúak legalább tíz százaléka esetében a fényváltozás amplitúdója és periódusa is modulált, vagyis ciklikusan változik. A jelenlegre több hipotézis is született, de jelenleg még egyik sem képes kielégítően megmagyarázni a modulációt. Egyes elképzelések a csillag forgásával, vagyis geometriai okokkal, míg mások fizikai okokkal, szerkezeti változásokkal vagy pulzációs módusok kölcsönhatásával igyekeznek a megfigyelt jellegzetességekről számot adni.

## 2. Célkitűzések

A doktori munkám kezdetén a pulzáló változóknak zajló, eltérő időskálájú folyamatok, a pulzáció, a moduláció, a módusok közti kölcsönhatás és az instabilitási sávra való be- vagy kilépés dinamikáját, megjelenési formáit és egymásra hatásának vizsgálatát terveztük. Elsőként a Blazskó-effektus egy új hipotézisét, a Stothers-féle konvektív ciklusok modelljét kezdtem behatóbban elemezni.

Ezzel egy időben állt pályára a *Kepler* űrtávcső. A *Kepler* látómezejébe számos RR Lyrae csillag esik, és már az első megfigyelések is egy új jelenségeket detektáltak: perióduskettőződést és igen alacsony amplitúdójú további módusokat. Az űrtávcső felfedezései hatására a moduláció mellett a módusok kölcsönhatásai lettek a kutatásaim másik kiemelt területe. A jelen-

ségek részletes leírása mellett hidrodinamikai modellekkel is vizsgáltam azok eredetét.

### 3. Vizsgálati módszerek

A kutatásokhoz modellszámításokat és mérési adatokat is felhasználtam. A modellszámításokat a Florida–Budapest hidrodinamikai kóddal végeztem. A kód egydimenziós, turbulens konvekciót is tartalmazó csillagmodelleket számol. Képes az egyensúlyi modell lineáris oszcillációs periódusait és növekedési rátáit megadni, illetve a megperturbált modelleket nemlineárisan számolni és a határciklusba konvergáltatni, majd annak a stabilitását is megadni. A modellszámításokat amplitúdóegyenletekkel számolt eredményekkel is összevetettem: ezzel az eljárással sokkal gyorsabban lehet a módusok amplitúdóinak változásait követni, de először az egyenletekben szereplő együtthatókat kell meghatározni. Ha már rendelkezésre állnak hidrodinamikai modellek, lehetséges hozzájuk illeszteni az amplitúdóegyenleteket. Az együtthatók meghatározása után a paramétertér már gyorsan feltérképezhető az egyenletek felhasználásával.

Adatelemzéshez elsősorban a *Kepler* űrtávcső mérési adatait használtam. A *Kepler* minden eddiginél pontosabb, mikromagnitúdós fotometriai pontosságot biztosít, legalább 90%-os időbeni lefedettség mellett. Az űrtávcső 170 000 csillagot képes egyszerre követni, amelyek között kb. 40 RR Lyrae típusú található.

Az űrtávcsöves megfigyelések mellett földi észleléseket is feldolgoztam: a V473 Lyrae csillagról számos forrás felhasználásával állítottam össze több évtizedet lefedő adatsorokat.

### 4. Saját tudományos eredmények

#### A Stothers-féle modell vizsgálata

1. A konvektív ciklusok modellje a csillagok konvektív rétegében bekövetkező változásokkal magyarázza a Blazskó-effektust. A feltételezés

szerint a ciklikusan felerősödő, majd legyengülő turbulens mágneses tér annyira megváltoztatja a konvektív réteg tulajdonságait, hogy az a pulzációban is megfigyelhető változásokat kelt. Hidrodinamikai modellek segítségével azonban megmutattam, hogy a lineáris pulzációs periódus elvárt mértékű elhangolódásához drasztikusan meg kell változnia a csillagmodell konvektív paramétereinek.

2. Nemlineáris modellek és amplitúdóegyenletek segítségével vizsgáltam a mechanizmus hatékonyságát eltérő időskálákon. Az eredményeim alapján a konvektív ciklusok csak kb. 150 napnál hosszabb modulációs periódus mellett képesek nagymértékű amplitúdóváltozást létrehozni, a pulzációs módus alacsony növekedési rátája miatt. Emiatt a mechanizmus nem alkalmas a rövid, héhány hetes periódusú és nagy amplitúdójú Blazskó-effektust mutató csillagok modulációjának magyarázatára.

## A perióduskettőződés modelljei

3. Perióduskettőződést detektáltam konvektív és radiatív RR Lyrae hidrodinamikai modellekben is. A jelenség többszörös bifurkáción is átmehet, négy- és nyolcperiódusos határciklust is azonosítottam. A perióduskettőződés létrejöttéhez a modellek konvektív paramétereit el kellett hangolnom a klasszikus értékektől a tisztán radiatív határeset felé. A jelenséget a *Kepler* űrtávcső által megfigyelt RR Lyrae csillagok is mutatják, így a modellek fontos szerepet kaptak az észlelések értelmezésében.

## Nemlineáris asztroszeizmológia

4. Az RR Lyrae csillag *Kepler* űrtávcsővel gyűjtött, rövid mintavételezésű adataiban a perióduskettőződés mellett olyan szakaszokat is azonosítottam, ahol hat eltérő amplitúdójú pulzációs ciklus mintázata mutat közel szabályos ismétlődést. A jelenséget az alapmódus és az első felhang közti, közel 3:4 frekvenciaarány miatti lebegés és a perióduskettőződés összeadódása okozza. A jelenség időszakos volta arra utal, hogy

az alaplómodus mellett az első felhang amplitúdója (és talán a fázisa) is változásokat mutat.

5. Igazoltam, hogy az RR Lyrae csillagban igen nagy valószínűséggel három radiális módus: az alaplómodus, az első felhang és a perióduskettőződésért felelős kilencedik felhang van jelen. Közel teljes egyezést találtam az észlelési adatok és a klasszikus RRab (alaplómodusú) tartományba tartozó, de az alaplómodus mellett perióduskettőzést és az igen kis amplitúdójú első felhangot tartalmazó hidrodinamikai modellek között. Ezzel az RR Lyrae lett az első a saját osztályából, amelynél három radiális módust sikerült azonosítani.

## A V473 Lyr csillag vizsgálata

6. A V473 Lyr cefeida csillagról kimutattam, hogy nemcsak a pulzáció amplitúdója, de a fázisa is modulált,  $1205 \pm 3$  napos periódussal. Ugyanakkor sem az amplitúdó, sem a fázis nem változik szigorúan szabályosan, és a fázis hosszabb, néhány modulációs ciklusnyi hosszúságú, további változásokat is mutat. A vizsgálataim alapján a csillag fényváltozásai megfeleltethetőek a Blazskó-effektusnak.

## 5. Következtetések

A doktori kutatómunkám célkitűzése a csillagok pulzációjához kapcsolódó időskálák és dinamikai jelenségek jobb megértése volt. Ezeket a célokat sikerrel teljesítettem.

A látszólag szerteágazó eredmények egy központi téma köré fűzhetőek fel. Az RR Lyrae csillagokban azonosított új jelenségek, a perióduskettőződés és a plusz módusok felfedték, hogy jelentős dinamikai folyamatok zajlanak ezen változócsillagok pulzációjában. A felfedezések egy új hipotézist is eredményeztek a Blazskó-effektus magyarázatára. A módusrezonanciák modellje a csillagban gerjesztődő módusok közti kölcsönhatásból eredezteteti a modulációt. Eredményeim, a Stothers-féle modell kritikájával, a perióduskettőződés

és a plusz módusok beható vizsgálataival, megerősítik, hogy a módusrezonanciák modellje alkalmas a Blazskó-effektus magyarázatára, sőt az összes modell közül az egyetlen, amely nem mond ellent az észlelési eredményeknek.

Három radiális módus azonosítása az RR Lyrae csillagban előrevetíti a nemlineáris asztroszeizmológia alkalmazhatóságát, vagyis a modellekben és a csillagokban ténylegesen gerjesztődő módusok amplitúdóinak és frekvenciáinak közvetlen összehasonlítását.

A módusrezonanciák modellje kiterjeszthető a cefeida csillagokra is. Bár fejlődésüket tekintve a cefeidák és RR Lyrae csillagok igen eltérő csillagtípusok, pulzációjuk sok hasonlóságot mutat. Ennek megfelelően a módusok közti kölcsönhatás okozta amplitúdóváltozás plauzibilis magyarázat lehet a kisszámú modulált cefeida, köztük a V473 Lyrae esetére is, és ugyanazokkal az eszközökkel modellezhető lesz, mint amelyet az RR Lyrae csillagoknál alkalmaztam.

## 6. A tézisek alapjául szolgáló publikációk

- Molnár, L.; Kolláth, Z.: *Linear period dependencies from free parameters in RR Lyrae models*, 2010, JPhCS, 218, 012027
- Kolláth, Z., Molnár, L., Szabó, R.: *Period doubling bifurcation and high-order resonances in RR Lyrae hydrodynamical models*, 2011, MNRAS, 414, 1111
- Molnár, L., Kolláth, Z., Szabó, R.: *Can turbulent convective variations drive the Blazhko cycle? Dynamical investigation of the Stothers idea*, 2012, MNRAS, 424, 31
- Molnár, L.; Kolláth, Z.; Szabó, R.; Bryson, S.; Kolenberg, K., Mullally, F., Thompson, S. E.: *Nonlinear Asteroseismology of RR Lyrae*, 2012, ApJ, 757, L13
- Molnár, L.; Kolláth, Z.; Szabó, R.; Plachy, E.: *New results in RR Lyrae modeling: convective cycles, additional modes and more*, 2012, AN, 333,

- Molnár, L.; Szabados, L.; Dukes, R. J., Jr.; Györfly, Á.; Szabó, R.: *Analysis of the possible Blazhko-effect Cepheid V473 Lyrae*, 2013, AN, közlésre elfogadva

## 7. További, kapcsolódó publikációk

- Molnár, L., Benkő, J. M., Szabó, R., Kolláth, Z.: *Kepler RR Lyrae stars: beyond period doubling* 2013, IAUS, közlésre elfogadva
- Plachy, E.; Kolláth, Z.; Molnár, L.: *Low-dimensional chaos in RR Lyrae models*, 2013, MNRAS, 433, 3590
- Szabó, R.; Kolláth, Z.; Molnár, L. és mtsai: *Does Kepler unveil the mystery of the Blazhko effect? First detection of period doubling in Kepler Blazhko RR Lyrae stars*, 2010, MNRAS, 409, 1244
- Molnár, L.; Kolláth, Z.; Szabó, R.: *Uncovering hidden modes in RR Lyrae stars*, Proceedings of the "20th Stellar Pulsation Conference Series", 2013, ASSP, 31, 185
- Jurcsik, J.; Sódor, Á.; Szeidl, B.; Hurta, Zs.; Váradi, M.; Posztobányi, K.; Vida, K.; Hajdu, G.; Kővári, Zs.; Nagy, I.; Molnár, L.; Belucz, B.: *The Konkoly Blazhko Survey: Is light-curve modulation a common property of RRab stars?*, 2009, MNRAS, 400, 1006